

زمین‌شناسی، کانه‌زایی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسار مس، سرب-روی قزلجه، شمال غرب زنجان

سیده عالیہ میرحسینی^۱، قاسم نباتیان^{۱*}، افشین زهدی^۲ و آرمین سلسانی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان،

زنجان، ایران

۲. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳. مدیرعامل شرکت سیمین معدن البرز، زنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸

چکیده

کانسار مس، سرب-روی قزلجه، در پهنه ایران مرکزی، در استان زنجان و در شمال شرق شهرستان ماه‌نشان واقع شده است. واحدهای سنگی موجود در این گستره متعلق به الیگومیوسن است که شامل سازندهای قرمز زیرین، قم و قرمز بالایی هستند. سازند قرمز بالایی که میزبان کانه‌زایی در این ناحیه است، شامل تناوبی از مارن، سیلت‌سنگ، ماسه‌سنگ قرمز و خاکستری می‌باشد که کانه‌زایی مس، سرب-روی درون واحدهای ماسه‌سنگی خاکستری رنگ رخ داده است. کانسار قزلجه شامل دو افق کانه‌زایی مس و سرب-روی است که افق مس در بخش زیرین افق کانه‌زایی سرب-روی قرار دارد. براساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی، کانی‌های اصلی شامل پیریت، کالکوسیت، کالکوپیریت، بورنیت، گالن، اسفالریت و کانی‌های ثانویه شامل سروریت، مالاکیت، آزوریت، کوولیت، اسمیت‌زونیت و گوتیت می‌باشند. بافت ماده معدنی از نوع دانه‌پراکنده، پیریت فرامبوئیدال، شبه‌لامینه‌ای و سیمان بین‌دانه‌ای جاننشینی، بازماندی، است. مطالعات صحرایی بیانگر آن است که وجود آثار و بقایای گیاهی و پیریت‌های دیاژنتیکی، از عوامل اصلی احیاکننده محیط و ته‌نشست سولفیدها در افق‌های کانه‌زایی هستند. قابل ذکر است که عیار سرب، روی و مس در این کانسار به ترتیب شش، سه و یک درصد است. نتایج مطالعات انجام شده بیانگر آن است که کانه‌زایی مس، سرب-روی کانسار قزلجه از نوع کانسارهای مس رسوبی تیپ Redbed می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سازند قرمز بالایی، مس رسوبی نوع Redbed، ایران مرکزی، قزلجه، زنجان.

مقدمه

اما این الزاماً به معنی تبعیت از لایه‌بندی رسوبی نیست (Cox et al., 2007). کانسارهای مس با میزبان رسوبی از نوع دیاژنتیکی است که بعد از نهشته شدن رسوبات میزبان و قبل از مرحله سنگ‌شدگی تشکیل می‌شوند. این نوع

کانسارهای مس با میزبان رسوبی به صورت استراتی باندا هستند و این به معنی آن است که کانسارهای مس محدود به تعدادی از لایه‌ها یا یک توالی رسوبی هستند،

ساخت و بافت کانسار قزلجه و همچنین ژئوشیمی سنگ میزبان ماده معدنی مورد بررسی قرار گرفته است. امید است که نتایج حاصل از پژوهش حاضر به همراه دیگر مطالعاتی که بر روی این ماسه‌سنگ‌ها در طی چند سال اخیر صورت گرفته است، در اکتشاف هر چه بهتر این نوع از کانسارها و همچنین در بازسازی دقیق زمین‌شناسی، جغرافیای دیرین و شرایط آب و هوایی زمان میوسن مورد استفاده قرار گیرد.

روش مطالعه

برای انجام این پژوهش، علاوه بر مطالعات صحرایی و تهیه نقشه زمین‌شناسی، از نمونه‌های برداشت شده در بازدیدهای صحرایی، تعداد ۳۰ مقطع نازک و نازک صیقلی به منظور مطالعات سنگ‌نگاری، بافتی، کانی‌شناسی و رسم توالی پاراژنری تهیه شده است. همچنین بر پایه مطالعات صحرایی نقشه زمین‌شناسی ناحیه و پروفیل آن رسم شد. برای انجام مطالعات ژئوشیمیایی در کانسار قزلجه، نمونه‌های برداشت شده از این کانسار مورد مطالعه به آزمایشگاه رزآما ارسال شد. در این آزمایشگاه، نمونه‌ها به روش XRF، برای تعیین میزان اکسیدهای اصلی و همچنین به روش ICP-MS، برای مشخص شدن مقدار دقیق عناصر کمیاب و کمیاب خاکی مورد آنالیز قرار گرفتند.

بحث

زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی کانسار مورد مطالعه

بر اساس تقسیمات پهنه‌های زمین‌ساختاری ایران زمین (آقائاتی، ۱۳۸۳)، ناحیه مورد مطالعه در بخش شمال غرب ایران مرکزی (شکل ۱-الف) واقع شده و بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ماه‌نشان (لطفی، ۱۳۸۰) را در برمی‌گیرد (شکل ۲-ب). راه دسترسی به کانسار مورد مطالعه، از طریق جاده آسفالت زنجان ماه‌نشان و همچنین جاده آسفالت زنجان-مشمپا امکان‌پذیر است. از نظر زمین‌شناسی واحدهای سنگی رخنمون یافته در این ناحیه شامل سازندهای قم و قرمز بالایی هستند (شکل‌های ۱ و ۲). سازند قرمز بالایی در این گستره شامل تناوبی از مارن‌های قهوه‌ای-خاکستری می‌باشد که در زیر مجموعه‌ای از آهک‌های ریفی متوسط‌لایه، مارن و ماسه‌سنگ‌های مارنی سازند قم قرار گرفته است. لازم به ذکر است که سازند قم

کانسارها مستقل از فرآیندهای ماگمایی هستند. سنگ‌های میزبان این کانسارها به دو نوع تقسیم می‌شوند: ۱- نوع کم انرژی شامل سیلت‌سنگ‌های دولومیتی و آهکی، سنگ‌های شیلی و کربناتی دریایی یا دریاچه‌ای، ۲- نوع پرانرژی شامل انواع ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومراها با منشأ قاره‌ای. کانسارهای مس با میزبان رسوبی توسط اختلاط سیالات در سنگ‌های رسوبی نفوذپذیر و به‌ندرت در سنگ‌های آتشفشانی شکل می‌گیرند (Cox et al., 2007).

کانسارهای مس رسوبی ایران در بلوک طبس، پهنه زاگرس، پهنه ایران مرکزی، پهنه سبزواری و پهنه کپه‌داغ گسترش دارند (نخجوانی و همکاران، ۱۳۹۸)؛ Maghfouri et al., 2020). این کانسارها در زمان‌های مختلف از جمله ۱. کامبرین زیرین-اردوئیسین (کانسار ده‌معدن و خونگاه در زاگرس)، ۲. پرمین (قره‌تپه در ایران مرکزی)، ۳. ژوراسیک بالایی (در ناحیه راور-طبس-عشق‌آباد در سازند گردو)، ۴. ژوراسیک بالایی-کرتاسه زیرین (در سازند شوربچه در پهنه کپه‌داغ)، ۵. الیگوسن-میوسن (در ناحیه بستان‌آباد-تبریز-تسوج) و ۶. پلیوسن (قره‌آغاج در پهنه ایران مرکزی) تشکیل شده‌اند (Maghfouri et al., 2020). کانسار مس، سرب-روی قزلجه در ۷۰ کیلومتری شمال غرب شهر زنجان و در شمال غرب نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ماه‌نشان (لطفی، ۱۳۸۰) میان طول‌های جغرافیایی $47^{\circ}41'42''$ تا $45^{\circ}42'45''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ}53'3''$ تا $47^{\circ}56'47''$ شمالی قرار گرفته است. این کانسار در پهنه زمین‌شناسی-ساختاری ایران مرکزی قرار گرفته است (شکل ۱-الف). از کانسارها و نشانه‌های معدنی مس و سرب-روی در این ناحیه می‌توان به کانسارهای اورتاسو (حقیقی و همکاران، ۱۳۹۵)، چهرآباد (رجب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵)، ساری‌کند (شکوری، ۱۳۹۷) اشاره کرد (Azizi et al., 2020; Maghfouri et al., 2018). کانسار قزلجه یکی از کانسارهای مهم در این ناحیه از استان زنجان است که در حال حاضر استخراج می‌شود. با توجه به اهمیت این موضوع برای انجام مطالعات دقیق پژوهشی، این کانسار برای مطالعه پژوهشی حاضر انتخاب شده است. در این پژوهش، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، کانی‌شناسی،

مس بوده و دارای ضخامت ۲۰ سانتی متر است. براساس مطالعات سنگ‌شناسی، این ماسه‌سنگ‌ها از نوع لیت‌آرنایت و فلدسپاتیک لیت‌آرنایت می‌باشند (میرحسینی و همکاران، ۱۳۹۹). همان‌طور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، در افق‌های زیرین سازند قرمز بالایی، لایه‌های تبخیری وجود دارند. علاوه بر آن، یکسری گنبد‌های نمکی از جمله گنبد نمکی چهارآباد، ساری‌کند و ایلجاق نیز در این ناحیه وجود دارند که این گنبد‌های نمکی و لایه‌های تبخیری در کانه‌زایی‌های ناحیه نقش بسزایی داشته‌اند. نتایج حاصل از مطالعات صورت گرفته بیانگر آن است که محیط تشکیل کانسار مس و سرب‌روی قزلجه شاید محیط رودخانه‌ای مئاندری نزدیک به خطوط ساحلی و جزر و مدی بوده است (میرحسینی، ۱۳۹۹).

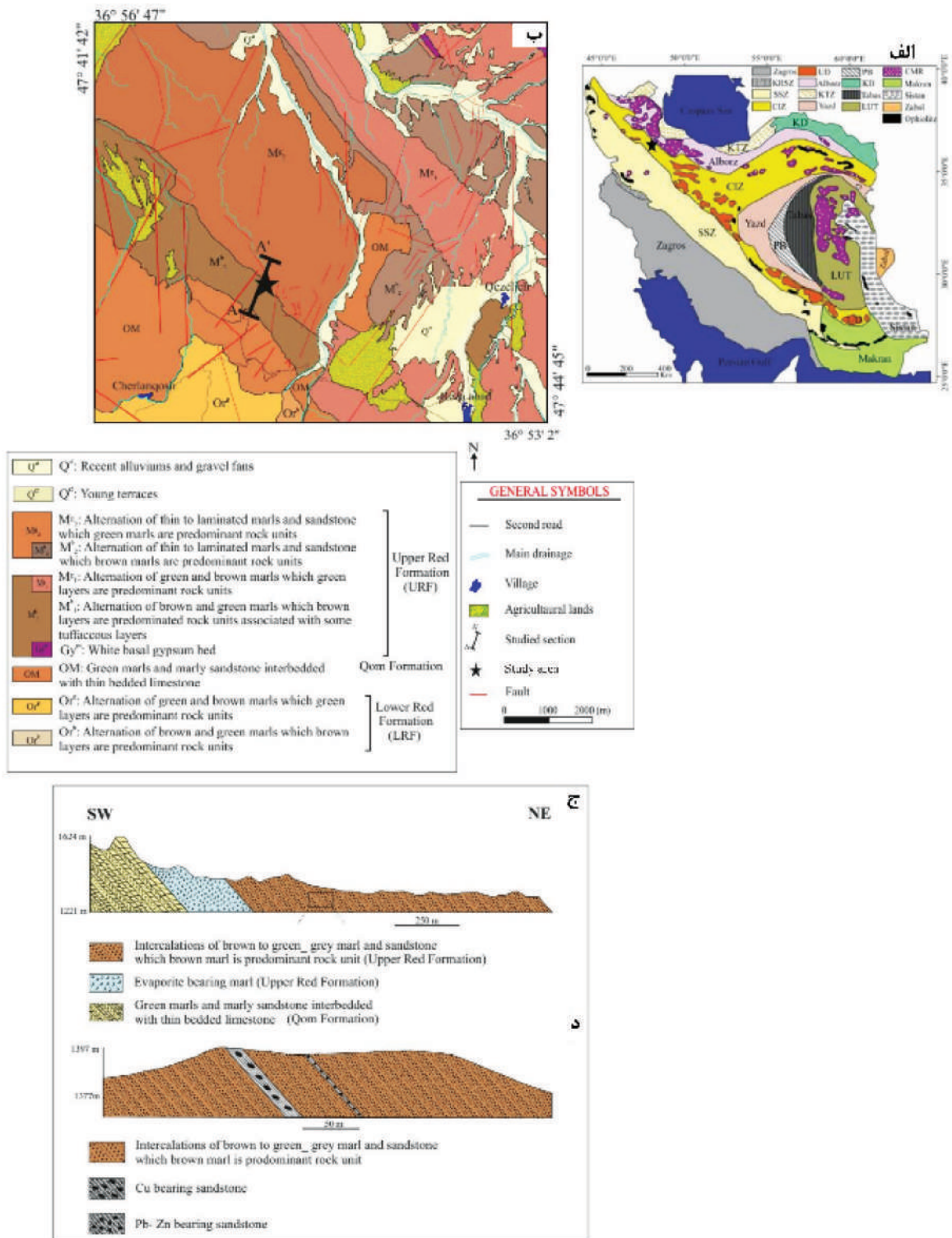
کانه‌زایی

کانه‌زایی مس و سرب‌روی در کانسار قزلجه در دو افق ماسه‌سنگی در مجموعه واحدهای رسوبی-تخریبی سازند قرمز بالایی رخ داده است (شکل‌های ۲ و ۳). سازند قرمز بالایی در این ناحیه شامل تناوبی از مارن‌های قرمز و خاکستری با میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ، کنگلومرا و سایر رسوبات تخریبی است (شکل‌های ۲، ۳ و ۴) که کانه‌زایی مس و سرب‌روی در این کانسار در داخل ماسه‌سنگ‌های خاکستری رنگ آن روی داده است. بخش‌های خاکستری که کانه‌زایی در آنها رخ داده است، در برخی بخش‌ها غنی از قطعات فسیل گیاهی هستند.

در ناحیه مورد مطالعه، کانه‌زایی مس بخش زیرین افق‌های کانه‌زایی را تشکیل می‌دهد که ضخامت آن در حدود شش تا هفت متر است و شیب آن در حدود ۷۰ الی ۸۰ درجه به سمت شمال است (شکل‌های ۳ و ۴). در کانسار قزلجه، سنگ میزبان کانه‌زایی مس، ماسه‌سنگ‌های خاکستری رنگ و سنگ‌های کنگلومرای هستند که به‌صورت میان‌لایه با واحدهای مارنی قرمز و خاکستری رنگ قرار دارند (شکل ۴). ماسه‌سنگ‌های میزبان کانه‌زایی در این بخش از نوع لیت‌آرنایتی و فلدسپات لیت‌آرنایت بوده و بافت ماده معدنی در این افق به‌صورت بافت‌های جانشینی، شبه‌لامینه‌ای، لنزی‌شکل، سیمان بین‌بلوری، بازماندی، پیریت فرامبوئیدال

در ناحیه زنجان دارای کانی‌سازی سلسنتین است (نوری و همکاران، ۱۳۹۸ و ۱۴۰۰). سازند قرمز بالایی در این ناحیه دارای گسترش قابل توجهی است و به‌طور کلی شامل سه بخش اصلی: الف) تناوب واحدهای تبخیری و مارن در بخش زیرین، ب) تناوب مارن‌های قرمز با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ قرمز و سبز رنگ در بخش میانی، و پ) افق‌های مربوط به مارن‌های سبز رنگ با میان‌لایه‌های ژئوپس در بخش بالایی توالی است (لطفی، ۱۳۸۰). ستون چینه‌شناسی رسم شده از سازند قرمز بالایی در کانسار قزلجه دارای ضخامتی در حدود ۷۵۰ متر بوده و شامل تناوبی از واحدهای سنگی از جنس شیل و مارن به رنگ قهوه‌ای همراه با میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ‌های خاکستری می‌باشد (شکل ۱-ج و د) (میرحسینی و همکاران، ۱۳۹۹). در کانسار قزلجه، بخش دارای تناوب مارن و ماسه‌سنگ متشکل از لایه‌های ماسه‌سنگی با ضخامت‌های دو اختصارات: Zagros: پهنه زاگرس؛ KRSZ: زون رادیولاریتی کرمانشاه؛ SSZ: پهنه دگرگونی-ماگمایی سنندج-سیرجان؛ UD: قوس ماگمایی ارومیه-دختر؛ CIM: خرده‌قاره ایران مرکزی (شامل بلوک‌های یزد، پشت‌بادام (PB)، طبس و بلوک لوت)، Alborz: رشته کوه‌های البرز؛ Makran: پهنه مکران؛ KD: دامنه‌های کپه‌داغ؛ Zabole: پهنه زابل؛ و CMR: سنگ‌های ماگمایی سنوزوئیک، ب) موقعیت کانه‌زایی‌های مس و سرب‌روی در ناحیه زنجان-ماه‌نشان، ج) پروفیل کلی از کانسار مورد مطالعه (محدوده کانه‌زایی با مستطیل مشکی مشخص شده است)، د) پروفیل محدوده معدنی قزلجه (موقعیت پروفیل در شکل ۲-ج نشان داده شده است).

در کانسار قزلجه، بخش دارای تناوب مارن و ماسه‌سنگ متشکل از لایه‌های ماسه‌سنگی با ضخامت‌های دو تا هشت متر است که در دو افق از آن‌ها کانه‌زایی مس-سرب و روی رخ داده است. این ماسه‌سنگ‌ها بیشتر از کانی‌های کوارتز، فلدسپات و خرده‌سنگ‌های رسوبی و دگرگونی و به میزان کمتر آتشفشانی تشکیل شده‌اند. کانه‌زایی مس در این کانسار، علاوه بر اینکه در داخل واحدهای ماسه‌سنگی روی داده است در داخل یک افق کنگلومرای نیز رخ داده است که این افق بلافاصله در بخش زیرین افق ماسه‌سنگی دارای کانه‌زایی

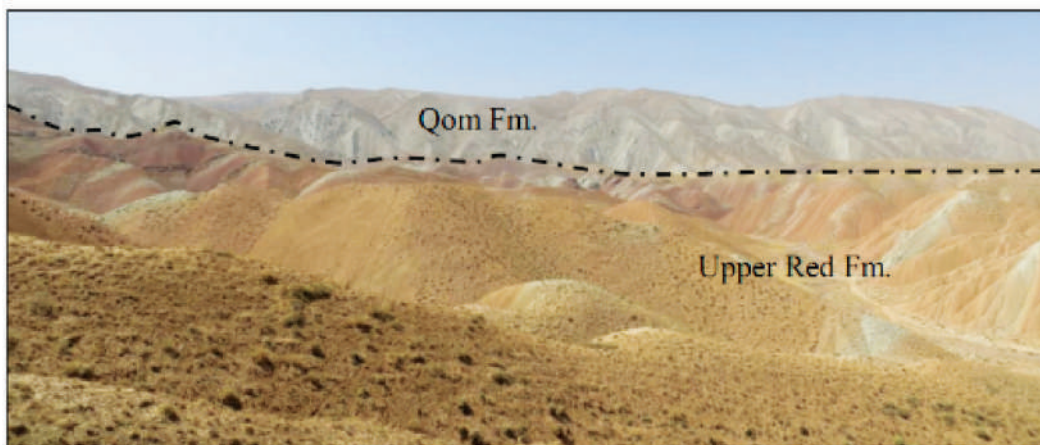


شکل ۱. الف) موقعیت کانسار مورد مطالعه بر روی پهنه‌های ساختاری ایران (Aghanabati 2005; 1998; Alavi 1991)

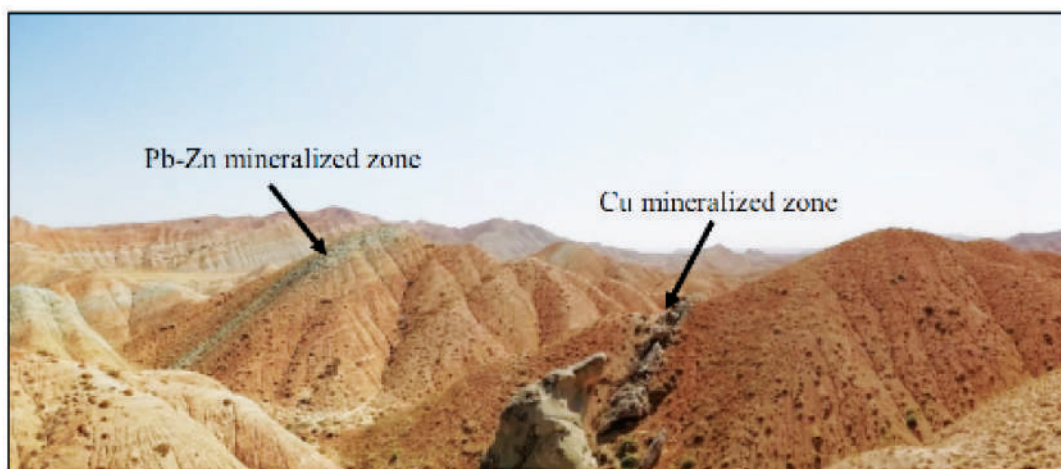
و دانه‌پراکنده هستند (شکل ۵-الف و ب). کالکوسیت، کولیت، کالکوپیریت، پیریت، ملاکیت و آزوریت مهم‌ترین کانی‌های موجود در این بخش از کانسار هستند. بررسی‌های صحرایی اولیه از کانسار قزلجه نشان می‌دهد که مواد ارگانیکی از جمله بقایای گیاهی ناحیه یکی از عوامل موثر در تمرکز و شکل‌دهی کانه‌زایی است (شکل ۵-ج).

سیده عالیبه میرحسینی و همکاران

براساس مطالعات هیتزمن (Hitzman et al., 2005) و براون (Brown, 2006)، وجود آثار و بقایای گیاهی یکی از عوامل موثر و مهم در تشکیل این نوع کانه‌زایی می‌باشد. قابل ذکر است که عیار سرب در این کانسار شش درصد، روی سه درصد و مس برابر با یک درصد بوده و در مجموع، تناژ ماده معدنی برابر با ۱۹۰ هزار تن می‌باشد. ماده معدنی در این کانسار دارای طول حدود ۲۵۰ متر و ضخامت میانگین ۷۰ سانتی‌متر می‌باشد که تا عمق ۲۰۰ متر گسترش دارد.



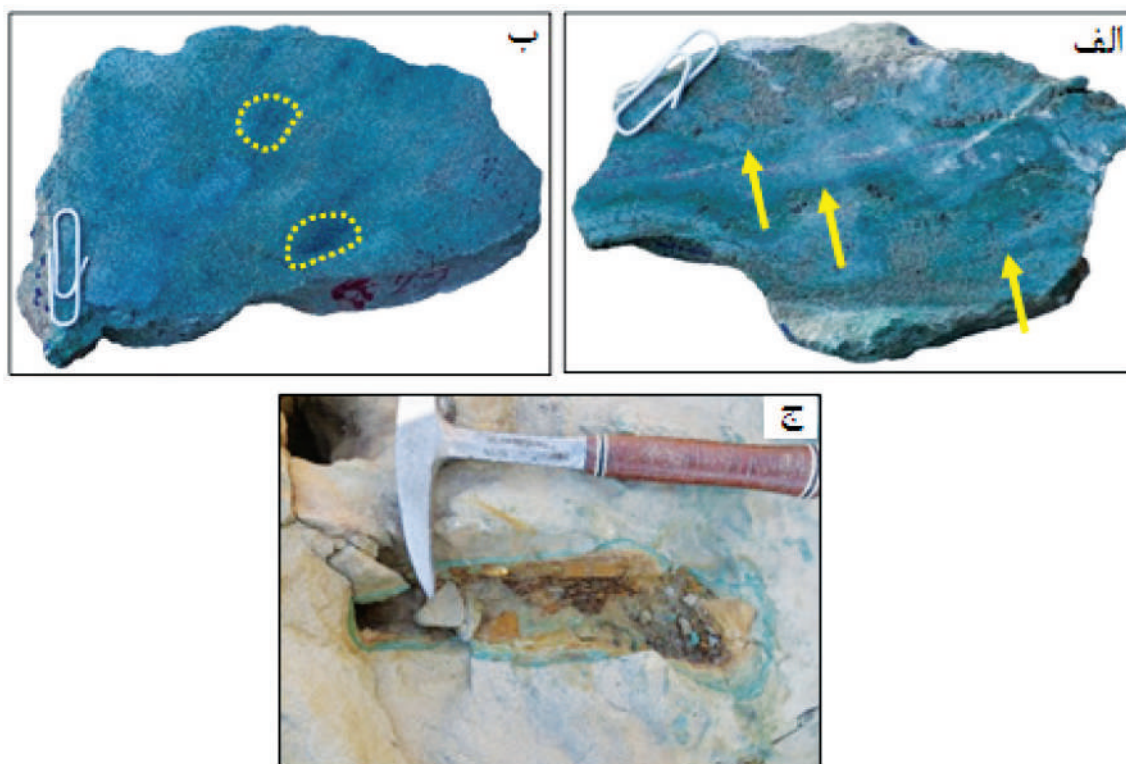
شکل ۲. رخنمونی از سازندهای موجود در کانسار قزلجه (دید به سمت جنوب غرب)



شکل ۳. نمایی دور از کانه‌زایی مس و سرب-روی در کانسار قزلجه (دید به سمت شمال شرق)

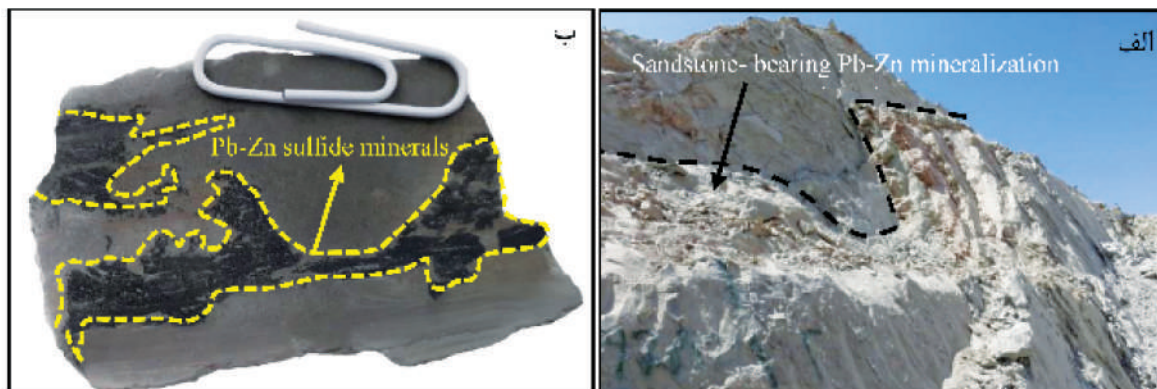


شکل ۴. رخنمون‌هایی از افق کانه‌زایی مس در کانسار قزلجه، الف) دید به سمت جنوب، ب) دید به سمت غرب



شکل ۵. بافت‌های موجود از افق کانه‌زایی مس در کانسار قزلجه. الف) بافت شبه‌لامینه‌ای، ب) بافت لنتزی شکل، ج) نمونه حاوی فسیل گیاهی (شبيه به تنه درخت) که اطراف آن کانه‌زایی مس رخ داده است. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است

کانه‌زایی سرب-روی در این کانسار در بخش بالایی افق کانه‌زایی مس روی داده و این افق نیز به صورت همروند با لایه‌بندی سنگ‌ها تشکیل شده است. در این افق، کانه‌زایی دارای امتداد شمال شرقی-جنوب غربی است و شبیه حدود ۷۰ تا ۸۰ درجه به سمت شمال دارد (شکل ۶-الف و ب). کانه‌های اصلی تشکیل شده در این بخش شامل گالن، اسفالریت و پیریت هستند و بافت‌های غالب موجود در این بخش شامل دانه‌پراکنده، لنتزی، شبه‌لامینه‌ای و جان‌شینی می‌باشند (شکل ۶-ب). در مقاطع میکروسکوپی گالن، اسفالریت و پیریت کانی‌شناسی اولیه را تشکیل می‌دهند و کانی‌های ثانویه تشکیل شده در این بخش شامل سروریت، اسمیت‌زونیت و اکسیدهای آهن هستند.



شکل ۶. الف) نمایی نزدیک از افق کانه‌زایی سرب-روی در کانسار قزلجه (دید به سمت غرب)، ب) نمونه دستی از کانه‌زایی سرب-روی در ماسه‌سنگ‌های ناحیه مورد مطالعه

رنگ ماسه‌سنگ‌ها به رنگ خاکستری متمایل به سبز در آمده است (شکل ۷). به عقیده مکینتیر (MacIntyre, 2005) مرز بین پهنه شسته‌شده و بخش قرمز اکسیدان به نحوی است که تغییر رنگ سنگ‌ها از قرمز به خاکستری در کمتر از یک سانتی‌متر رخ می‌دهد. وجود فسیل گیاهی که کانه‌زایی در ارتباط با آنها می‌باشد، در این بخش‌ها قابل مشاهده است. مواد ارگانیکی و پیریت‌های دیاژنتیکی از عوامل مهم در احیایی کردن سیالات در این افق‌ها به شمار می‌روند. براساس وودوارد و همکاران (Woodward et al., 1974)، آب بین سازندی در بخش‌های نفوذپذیر، وقتی که در مجاورت مواد آلی و پیریت‌های دیاژنتیکی قرار می‌گیرد، احیا می‌شود و در نتیجه باعث شسته شدن رسوبات قرمز اطراف خود می‌شود. مواد آلی و پیریت‌های دیاژنتیک موجود، باعث احیایی شدن سیالات در این افق‌ها شده‌اند. سیالات احیایی تشکیل شده نیز باعث تغییر رنگ این لایه‌ها از قرمز-نارنجی به سفید و یا خاکستری مایل به سبز شده‌اند. در این پهنه‌ها، اکسید آهن به دلیل شسته شدن توسط سیالات احیایی دیده نمی‌شود (شکل ۸-الف). از شواهد موجود برای این پهنه‌ها می‌توان به شسته شدن اکسیدهای آهن از اطراف دانه‌ها، تشکیل پیریت‌های دانه‌پراکنده اشاره کرد (شکل ۸). قابل ذکر است که این پهنه دارای زیرپهنه کانه‌زایی است که در ادامه توضیح داده شده است.

پهنه‌های موجود در افق‌های کانه‌زایی

به‌طور کلی افق‌های کانه‌زایی در کانسار قزلجه شامل دو پهنه قرمز اکسیدان و شسته شده است که براساس ویژگی‌های آنها از جمله کانی‌شناسی، رنگ ظاهری و نوع ماده معدنی از همدیگر تفکیک شده‌اند. در ادامه این پهنه‌ها توضیح داده شده‌اند.

پهنه قرمز اکسیدان^۱

پهنه قرمز اکسیدان در اطراف افق‌های خاکستری رنگ قرار دارد که شامل لایه‌های مارن قرمز رنگ و ماسه‌سنگ می‌باشد (شکل ۴-الف). این بخش‌ها حاوی مقادیر زیادی اکسیدهای آهن هستند که دلیل قرمز رنگ بودن این بخش وجود همین کانی‌های اکسیدی آهن است. ماسه‌سنگ‌های موجود در این بخش‌ها از نوع لیت‌آرنایت تا فلدسپات لیت‌آرنایت بوده و بیشتر از کوارتز، فلدسپات، خرده‌سنگ و کانی‌های رسی تشکیل شده‌اند (میرحسینی و همکاران، ۱۳۹۹). رنگ این بخش از قهوه‌ای تیره تا نارنجی روشن تغییر می‌کند.

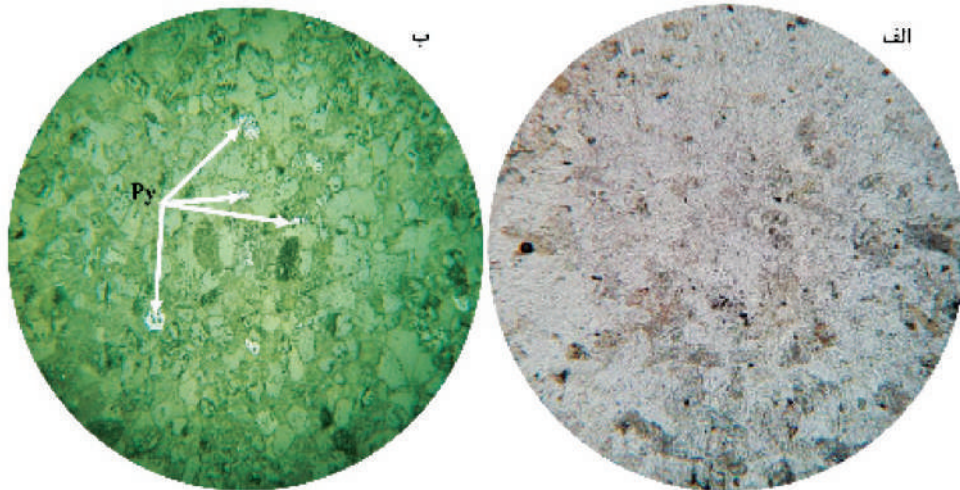
پهنه شسته شده^۲

بخش‌هایی از ماسه‌سنگ‌ها به دلیل فرآیند دگرسانی، دچار تغییر رنگ شده‌اند، این بخش‌ها در واقع همان پهنه‌های شسته شده می‌باشند که تحت تاثیر سیال احیایی،



شکل ۷. نمایی نزدیک از پهنه شسته‌شده در کانسار قزلجه

1. Red oxidized zone
2. Bleached zone



شکل ۸. الف) تصویر میکروسکوپی از ماسه‌سنگ شسته شده در کانسار قزلجه، همان‌طور که در این تصویر مشاهده می‌شود، اکسیدهای آهن از اطراف دانه‌های آواری شسته شده‌اند، ب) تصویر میکروسکوپی از بلورهای ریز پراکنده پیریت (Py) در متن ماسه‌سنگ شسته شده در کانسار قزلجه

زیر پهنه کانه‌دار^۱

شده‌اند می‌توان به کالکوسیت ثانویه (کالکوسیت نسل دوم)، مالاکیت، آزوریت، کوولیت، سرروزیت، اسمیت‌زونیت و گوتیت اشاره کرد. پیریت یکی از معمول‌ترین کانی‌های موجود در کانسار قزلجه می‌باشد که در هر دو افق کانه‌زایی (مس و سرب-روی) تشکیل شده است. براساس روابط بافتی، پیریت‌های موجود در کانسار قزلجه را می‌توان به دو نسل تقسیم کرد: (۱) پیریت‌های فرامبوئیدال که پیریت‌های نسل اول را تشکیل می‌دهند (شکل ۹-الف و ب) و (۲) پیریت‌های نسل دوم که اغلب بی‌شکل بوده و به‌صورت دانه‌پراکنده همراه کالکوسیت، کالکوپیریت، بورنیت، اسفالریت و گالن تشکیل شده‌اند (شکل ۹-ج و چ). پیریت‌های نسل اول و دوم در اثر فرایندهای هوازدگی و سوپرژن، از حاشیه بلورها در حال تبدیل شدن به گوتیت هستند. کالکوپیریت در آنها کانه‌زایی مس و در داخل ماسه‌سنگ‌هایی که کانه‌زایی در آنها روی داده است، به‌صورت دانه‌پراکنده، سیمان بین‌دانه‌ای، جاننشینی و بازماندی مشاهده می‌شود. کالکوپیریت همواره از حاشیه‌ها به کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت، آزوریت و اکسیدهای آهن دگرسان شده و بقایایی از آن به‌صورت بافت بازماندی، باقی مانده‌اند (شکل ۹-چ). براساس روابط بافتی،

مهم‌ترین عامل در تشکیل این زیرپهنه، فراوانی قطعات فسیل گیاهی و مواد آلی، وجود پیریت‌های فرامبوئیدال و در نتیجه ایجاد شرایط احیا، همراه با نفوذپذیری سنگ‌ها در پهنه شسته‌شده می‌باشد (شکل ۳). در این زیرپهنه‌ها (زیرپهنه مس و زیرپهنه سرب و روی)، همراه با مواد آلی و پیریت‌های فرامبوئیدال، کانه‌زایی مس، سرب و روی تشکیل شده است. بافت‌هایی که در این زیرپهنه‌ها تشکیل شده‌اند شامل سیمان بین‌بلوری، جاننشینی، شبه‌لامینه‌ای، بازماندی و دانه‌پراکنده هستند. مهم‌ترین کانی‌هایی که در این بخش دیده می‌شوند عبارتند از: گالن، اسفالریت، کالکوسیت، کالکوپیریت بورنیت و پیریت.

کانی‌شناسی، ساخت و بافت

مطالعه مقاطع نازک-صیقلی تهیه شده از بخش‌های کانه‌دار نشان می‌دهد که کانه‌های اصلی موجود در افق مس شامل پیریت (نسل اول و دوم)، کالکوپیریت، کالکوسیت (نسل اول و دوم) و بورنیت هستند (شکل ۹). در افق کانه‌زایی سرب و روی کانه‌هایی از جمله پیریت (نسل دوم)، اسفالریت و گالن قابل مشاهده‌اند (شکل ۹). از کانی‌های ثانویه که در اثر فرایندهای سوپرژن و هوازدگی در کانسار قزلجه تشکیل

1. Mineralized subzone

پیریت با بافت فرامبوئیدال

بافت فرامبوئیدال همگی در پیریت‌هایی که به صورت خوشه‌ای کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، دیده می‌شود (شکل ۹-الف، ب). براساس نظریه لاو و بروکلی (Love and Brockley, 1973)، پیریت فرامبوئیدال در شرایطی که سولفیدهای آهن با سرعت بالایی متبلور می‌شوند، پس از ته‌نشست ژل سولفیدی از تبدیل ژل FeS به پیریت و در مراحل اولیه دیاژنز تشکیل می‌شود.

بافت شبه‌لامینه‌ای

یکی از بافت‌هایی که می‌تواند شرایط رسوبی-دیاژنز اولیه را نشان دهد، بافت شبه‌لامینه‌ای است. این بافت در ماسه‌سنگ‌های میزبان کانه‌زایی به صورت نوارهای موازی با لایه‌بندی سنگ میزبان در کانسار قزلجه تشکیل شده است (شکل ۱۰).

بافت جانیشینی و بازماندی

بافت جانیشینی یکی دیگر از بافت‌های موجود در کانسار قزلجه است. این بافت در کانی‌های سولفیدی مس و سرب و روی مشاهده می‌شود. این بافت به صورت اولیه از جانیشینی کانی‌های سولفیدی به جای مواد آلی و همچنین پیریت فرامبوئیدال تشکیل شده است (شکل ۹-الف). همچنین این بافت در طی فرایندهای هوازدگی و سوپرژن تشکیل شده است که در طی آن، کانی‌های ثانویه از جمله مالاکیت، کالکوسیت ثانویه، سرروزیت، اسمیت‌زونیت و اکسیدهای آهن جانشین کانی‌های اولیه شده‌اند. این جانیشینی در برخی بخش‌ها به حدی بوده که بقایایی از کانی‌های اولیه باقی مانده و بافت بازماندی را تشکیل داده‌اند (شکل ۹-ج، ح).

توالی پاراژنزی و مراحل کانه‌زایی

براساس ویژگی‌های کانیایی و بافتی، توالی پاراژنتیکی به صورت نمودارهای خطی در ارتباط زمانی مواد معدنی و باطله‌ها، فراوانی نسبی کانی‌ها ترسیم می‌شود. براساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی می‌توان اظهار داشت که توالی پاراژنزی در کانسار مس و سرب-روی قزلجه، به ترتیب در طی سه مرحله به صورت زیر تشکیل شده است:

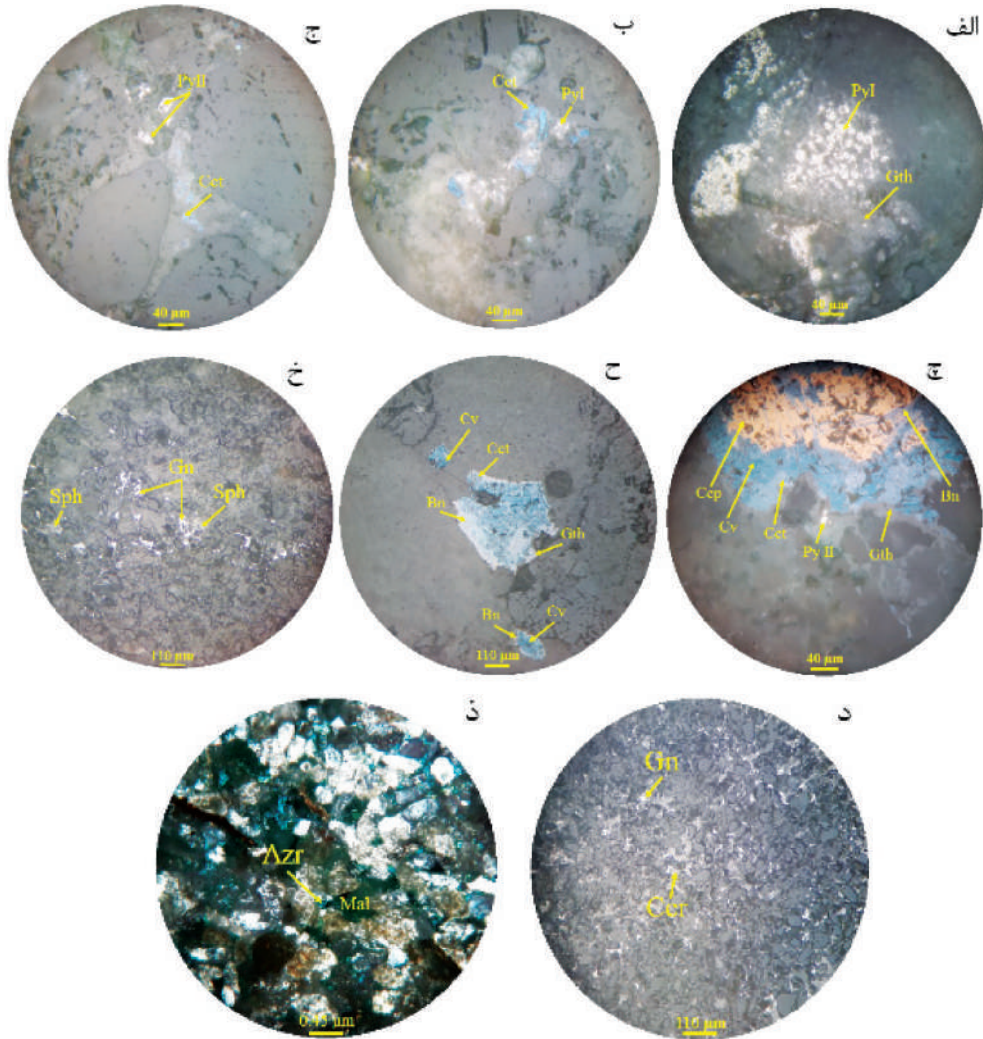
کالکوسیت‌های موجود را می‌توان به دو نسل تقسیم کرد. نسل اولیه که دارای بافت دانه‌پراکنده و سیمان بین‌بلوری بوده و در حال تبدیل شدن به کوولیت می‌باشد. این نسل از کالکوسیت‌ها، در طی کانه‌زایی مس در این ناحیه تشکیل شده است. نسل دوم کالکوسیت ثانویه بوده و در اثر فرایندهای هوازدگی و سوپرژن جایگزین کالکوپیریت شده‌اند (شکل ۹-ح و خ). بورنیت همراه با سایر کانی‌های سولفیدی در افق مس‌دار تشکیل شده و در طی فرایندهای سوپرژن و هوازدگی به کالکوسیت ثانویه، کوولیت و گوتیت تبدیل شده است (شکل ۹-چ). اسفالریت یکی دیگر از کانی‌های موجود در افق ماسه‌سنگی سرب و روی‌دار است که به همراه پیریت و گالن مشاهده می‌شود. اسفالریت نسبت به گالن فراوانی کمتری دارد و بیشتر به صورت سیمان بین‌دانه‌ای و یا به صورت دانه‌پراکنده قابل مشاهده است. قابل ذکر است که اسفالریت از حاشیه به اسمیت‌زونیت تبدیل شده است (شکل ۹-ذ). گالن اغلب به صورت بلورهای ریز بی‌شکل تا شکل‌دار دیده می‌شود و بیشتر به صورت دانه‌پراکنده، سیمان بین‌دانه‌ای، جانیشینی و شبه‌لامینه‌ای مشاهده می‌شود (شکل ۹-د و خ). گالن‌ها همواره از حاشیه به سرروزیت تبدیل می‌شوند (شکل ۹-د). کانی مالاکیت به همراه کانی آزوریت در این کانسار تشکیل شده‌اند و در رخنمون‌های ناحیه بیشتر به صورت هاله‌ای سبز و آبی رنگ دیده می‌شوند (شکل ۹-ذ).

بافت دانه‌پراکنده

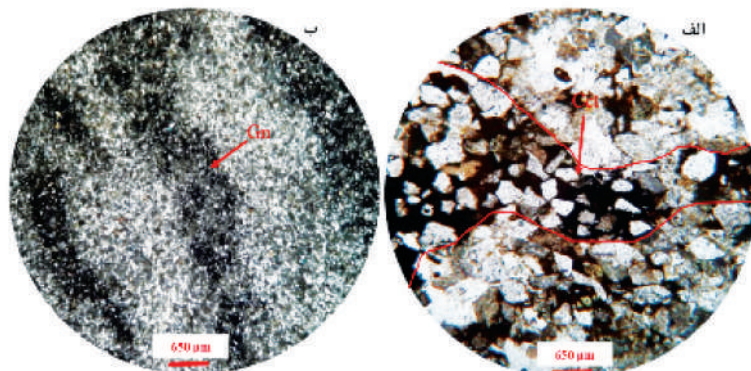
این بافت بیشتر در عدسی‌های غنی از مواد آلی و با درون بخش‌های نفوذپذیر حاوی مواد آلی و فسیل گیاهی مشاهده می‌شود. در کانسار مس و سرب-روی قزلجه، سولفیدهای مس، پیریت، اکسیدهای آهن و همچنین اسفالریت و گالن موجود در این کانسار دارای این بافت می‌باشند (شکل ۹-ج، د، ذ).

بافت سیمان بین‌دانه‌ای

بافت سیمان بین‌دانه‌ای حالت خاصی از بافت دانه‌پراکنده است، که فضای میان دانه‌های سنگ میزبان توسط کانی‌های سولفیدی پر می‌شود (MacIntyre, 2005). این بافت در هر دو افق کانه‌زایی مس و سرب-روی قابل مشاهده است (شکل ۹-ج).



شکل ۹. الف) تصویر میکروسکوپی از پیریت‌های فرامبوئیدال (PyI) در کانسار قزلجه که در برخی بخش‌ها به گوتیت (Gth) تبدیل شده‌اند، ب) پیریت‌های فرامبوئیدال (PyI) که در داخل کالکوسیت (Cct) قرار دارند، ج) هم‌رشدی پیریت‌های نسل دوم (Py II) و کالکوسیت اولیه (Cct) با بافت دانه‌پراکنده و سیمان بین دانه‌ای، چ) همراهی پیریت نسل دوم (PyII) با کالکوپیریت (Ccp) و بورنیت (Bn) در افق کانه‌زایی مس که به کانی‌های ثانویه از جمله کالکوسیت (Cct)، کوولیت (Cv) و گوتیت (Gth) تبدیل شده‌اند، ح) کالکوسیت ثانویه (Cct)، کوولیت (Cv) و گوتیت (Gth) که جانشین بورنیت (Bn) شده‌اند، خ) کانی گالن (Gn) به همراه اسفالریت (Sph) با بافت دانه‌پراکنده و سیمان بین دانه‌ای در کانسار قزلجه، د) کانی گالن با بافت سیمان بین دانه‌ای که در اثر فرایندهای هوازدگی و سوپرژن به سروریت (Cer) تبدیل شده است، ذ) کانی آزوریت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده‌اند



شکل ۱۰. الف) تصویر میکروسکوپی از بافت شبه‌لامینه‌ای کالکوسیت (Cct) در نور یک بار پلاریزه، ب) تصویر میکروسکوپی بافت شبه‌لامینه‌ای گالن (Gn)

هنگام عبور از بین رسوبات، عناصر سرب-روی و مس را شسته و همراه خود به افق‌های احيایی منتقل می‌کنند. در نتیجه این فرآیند، افق‌های شسته شده به وجود می‌آیند (Brown, 2003). سیال احيایی تولید شده، اکسیدهای آهن اطراف دانه‌ها را شسته و در مجاورت H_2S باعث تولید پیریت‌های ریز و دانه‌پراکنده می‌شود. در این مرحله و در اثر احيای محیط شرایط لازم برای کانه‌زایی و تشکیل کانی‌های سولفیدی مانند گالن، اسفالریت، بورنیت، پیریت نسل دوم، کالکوسیت نسل اول و کالکوپیریت فراهم می‌گردد. این کانی‌ها بیشتر به صورت سیمان بین‌بلوری در بین ذرات قرار می‌گیرد. بافت‌های اصلی موجود در این مرحله شامل بافت جانشینی، دانه‌پراکنده، شبه‌لامینه‌ای و سیمان بین‌دانه‌ای است.

کانه‌زایی بعد از تشکیل ماده معدنی (Post-mineralization)

در مرحله بعد از تشکیل ماده معدنی فرآیند تراکم باعث فشرده شدن سنگ‌ها می‌شود. این فرآیند در مناطق عمیق‌تر و موقع بالآمدگی رسوبات اتفاق می‌افتد. در این مرحله رسوبات و سنگ‌ها تحت تاثیر فرایندهای هوازدگی و سوپرژن قرار گرفته و پهنه اکسیدان گسترش فراهم می‌یابد. در طی این مرحله، کانی‌های سولفیدی تحت تاثیر سیالات جوی قرار می‌گیرند و باعث تشکیل کانی‌های ثانویه‌ای از جمله اسمیت‌زونیت، سروزیت، کالکوسیت ثانویه، مالاکیت، آزروریت و گوتیت می‌شوند. از جمله بافت‌هایی که در این مرحله تشکیل شده‌اند می‌توان به بافت‌های جانشینی و بازماندی اشاره کرد.

توالی پاراژنتیکی و مراحل تشکیل کانی‌ها در کانسار قزلبه در شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند.

ژئوشیمی عناصر اصلی

مطالعه عناصر اصلی اغلب به ۱۰ عنصری محدود می‌شود

1. Pre-mineralization
2. Mineralization
3. Post-mineralization
4. Syn-diagenesis
5. Early-diagenesis

۱. مرحله قبل از تشکیل ماده معدنی^۱ یا هم‌زمان با رسوب‌گذاری؛

۲. کانه‌زایی اصلی یا مرحله تشکیل ماده معدنی^۲ در طی فرآیند دیاژنز؛

۳. مرحله بعد از تشکیل ماده معدنی^۳ که مرتبط با فرایندهای هوازدگی و سوپرژن است.

مرحله قبل از تشکیل ماده معدنی

این مرحله از کانه‌زایی کمی پس از ته‌نشست رسوبات روی داده است (Durieux and Brown, 2007) و شامل مراحل هم‌زمان با دیاژنز^۴ و دیاژنز اولیه^۵ در فرآیند تشکیل ماسه‌سنگ‌های میزبان کانه‌زایی می‌باشد.

در مرحله دیاژنز اولیه کلسیت بیشتر به صورت سیمان کلسیتی در فضای بین ذرات تجمع پیدا کرده و تشکیل آن تا اواخر دیاژنز پایانی ادامه داشته است. بلورهای ریزتر سیمان کلسیتی در مراحل ابتدایی و بلورهای درشت‌تر با خاموشی موجی مربوط به مراحل پایانی دیاژنز هستند. منشا کربنات کلسیم می‌تواند از آب‌های درون حفره‌ای باشد (Tucker, 2009). در اواخر مرحله دیاژنز اولیه، در اثر اکسیداسیون ترکیبات آلی که باعث اسیدی‌تر شدن محیط می‌شود، pH محیط کاهش پیدا می‌کند و باعث انحلال سیمان کربناته بین دانه‌ها و افزایش تخلخل و نفوذپذیری می‌شود (Walker, 1989). در طی فرآیند تجزیه کانی‌های سیلیکاته آهن‌دار از جمله بیوتیت، آهن موجود در ساختمان آنها به صورت آهن فروکسید آزاد شده و باعث قرمز شدن رسوبات می‌شود. همچنین با گذشت زمان بیشتر، رنگ رسوبات تیره‌تر می‌شود (Walker, 1989). طی این مرحله، پیریت‌های فرامبوئیدال (PyI) تشکیل شده‌اند. این نوع از پیریت‌ها در زمان ته‌نشست، از یک ژل سولفیدی که هم‌زمان با ذرات آواری رسوب کرده است، در مراحل اولیه دیاژنز جدا می‌شود (Love and Brockly, 1973).

کانه‌زایی اصلی یا مرحله تشکیل ماده معدنی

در ادامه فرآیند دیاژنز و در مرحله کانه‌زایی، با توجه به نفوذپذیری ایجاد شده، فضای لازم برای عبور سیال بین سازندی ایجاد می‌شود. در نتیجه سیالات بین سازندی

Minerals, textures and processes	Syn-sedimentary	Early diagenesis	Middle diagenesis	Late diagenesis	Supergene and weathering
Pyrite-I		----			
Pyrite-II		----			
Chalcopyrite I		----			
Sphalerite		----			
Galena		----			
Chalcocite-I		----			
Bornite		----			
Cerussite					
Smithsonite					
Goethite					
Covellite					
Malachite					
Azurite					
Chalcocite-II					
Calcite cement					
Replacement					
Disseminate					
Intergranular cement					
Solution seams					
Relict					

شکل ۱۱. توالی پاراژنتیکی کانسار مس و سرب-روی قزلجه

آهکی و سیمان کلسیتی موجود در نمونه‌ها باشد (Das et al., 2006). انطباق مثبت بین K_2O و Al_2O_3 نشان‌دهنده تمرکز کانی‌های پتاسیم‌دار در نمونه‌های مورد بررسی است (شکل ۱۲).

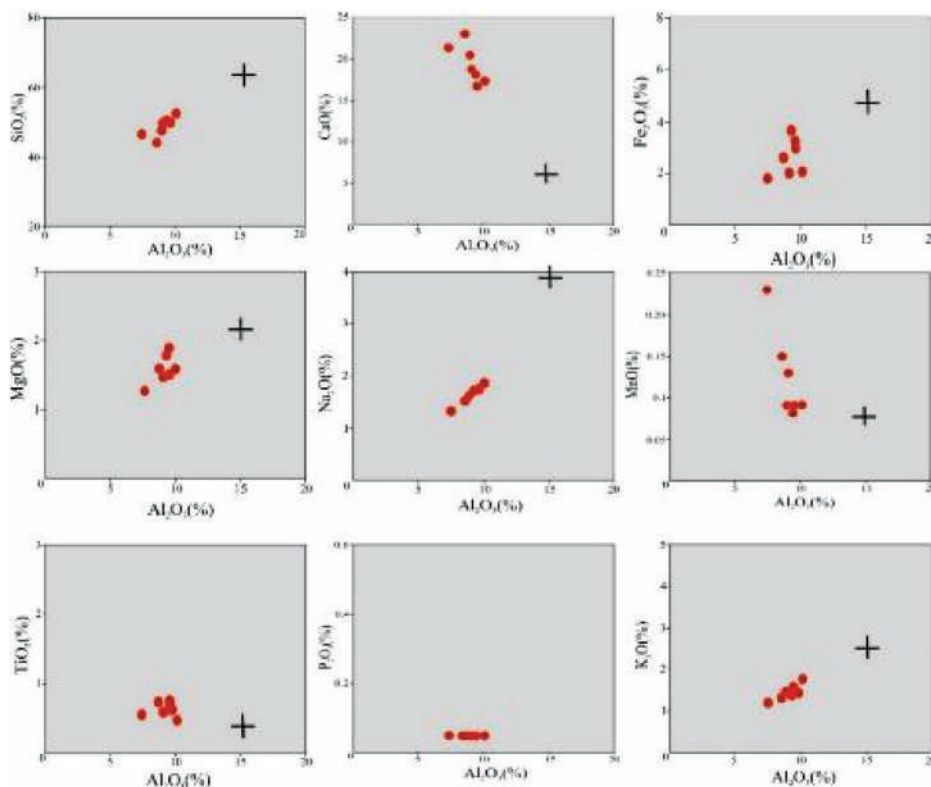
نام‌گذاری ماسه‌سنگ‌ها براساس داده‌های ژئوشیمیایی

براساس نتایج مطالعات میکروسکوپی به‌دست‌آمده از سنگ میزبان این کانسار، مشخص شد که بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه در کانسار قزلجه، ماسه‌سنگ نوع لیتارنایت هستند و تعدادی از نمونه‌ها نیز در محدوده لیتارنایت فلدسپات‌دار قرار می‌گیرند (میرحسینی و همکاران، ۱۳۹۹). علاوه بر مطالعات پتروگرافی برای نام‌گذاری ماسه‌سنگ‌ها در محدوده کانه‌زایی قزلجه، از نسبت اکسیدهای اصلی برای پی بردن به نوع ماسه‌سنگ میزبان کانسنگ استفاده شد. ابتدا از طبقه‌بندی پتی‌جان (Pettijohn et al., 1972)، و رسم نمودارهای دو متغیره $\text{Log} (SiO_2/Al_2O_3) - \text{Log} (Na_2O/K_2O)$ استفاده شد و همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه در بخش لیتارنایت قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از این طبقه‌بندی با نتایج مطالعات میکروسکوپی هماهنگ می‌باشند.

که به‌طور مرسوم در تجزیه‌ی شیمیایی به‌صورت اکسید بیان می‌شوند (جدول ۱). توزیع عناصر اصلی، منعکس‌کننده کانی‌شناسی نمونه‌های مورد مطالعه است. در میان این اکسیدها، MgO ، CaO ، Na_2O متحرک و اکسیدهای Al_2O_3 و TiO_2 غیرمتحرک هستند (Bauluz et al., 2000). به دلیل اینکه Al_2O_3 در طی هوازدگی، دیازنز و متامورفیزم، به نسبت بدون تغییر است، همواره به‌عنوان فاکتوری جهت مقایسه بین لیتولوژی‌های مختلف به کار می‌رود (Cardenas et al., 1996). نمودار تغییرات عناصر اصلی نسبت به Al_2O_3 در نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که پراکندگی SiO_2 با Al_2O_3 همخوانی مثبت دارد که نشان‌دهنده وجود فلدسپارها، میکا و کانی‌های رسی در ماسه‌سنگ‌ها است (Dabard, 1990). در این نمودارها، MnO و P_2O_5 ، TiO_2 روند بخصوصی را نشان نمی‌دهند، Na_2O ، K_2O ، MgO و Fe_2O_3 روند مثبت و CaO روند منفی را با Al_2O_3 نشان می‌دهند. تبعیت اکسیدها از روند Al_2O_3 نشان‌دهنده فراوانی کانی‌های رسی در این ماسه‌سنگ‌ها است، چراکه این عنصر به‌طور خاص در آلومینوسیلیکات‌ها حضور دارد. همچنین حضور ماتریکس در فضای بین ذرات اصلی تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌ها، می‌تواند دلیلی دیگری بر حضور کانی‌های رسی در توالی مورد مطالعه باشد. مقدار بالای MgO ، CaO و Fe_2O_3 می‌تواند به علت وجود اکسیدهای آهن، خرده‌های

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی عناصر اصلی برای کانسار مس و سرب-روی قزلجه (مقادیر به درصد هستند)

Sample No	Am-B1	Am-11	Am-17	Am-31	Am-32	Am-34	Am-35	Am-6
SiO ₂	۴۴/۳۵	۵۲/۳۳	۴۶/۳۵	۲۸/۴۸	۵۰/۱۲	۵۰/۲۲	۴۹/۷۹	۴۲/۶۲
Al ₂ O ₃	۸/۶۳	۱۰/۰۵	۷/۴۲	۹/۰۶	۹/۵۶	۹/۵۰	۹/۲۵	-
BaO	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
CaO	۲۲/۸۰	۱۷/۳۱	۲۱/۲۹	۲۰/۴۲	۱۶/۷۲	۱۸/۰۳	۱۸/۳۸	۱۳/۵۱
Fe ₂ O ₃	۲/۷۴	۲/۱۷	۱/۸۸	۲/۱۱	۳/۱۴	۳/۳۶	۳/۷۱	۱/۵۱
K ₂ O	۱/۳۵	۱/۸۱	۱/۲۰	۱/۴۹	۱/۵۱	۱/۵۶	۱/۴۷	۱/۴۶
MgO	۱/۵۶	۱/۵۶	۱/۲۸	۱/۴۷	۱/۵۰	۱/۸۷	۱/۷۶	۱/۱۶
MnO	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۲۳	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹
Na ₂ O	۱/۵۰	۱/۸۷	۱/۳۴	۱/۶۳	۱/۷۴	۱/۷۲	۱/۶۹	-
P ₂ O ₅	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
SO ₃	۰/۰۵	۰/۰۵	۱/۱۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۱	۱/۶۰
TiO ₂	۰/۷۳	۰/۴۵	۰/۵۴	۰/۵۶	۰/۷۹	۰/۷۰	۰/۷۱	۰/۳۸
LOI	۱۶/۰۶	۱۲/۳۰	۱۶/۰۸	۱۴/۸۶	۱۲/۴۰	۱۲/۹۱	۱۳/۱۴	۱۶/۸۲

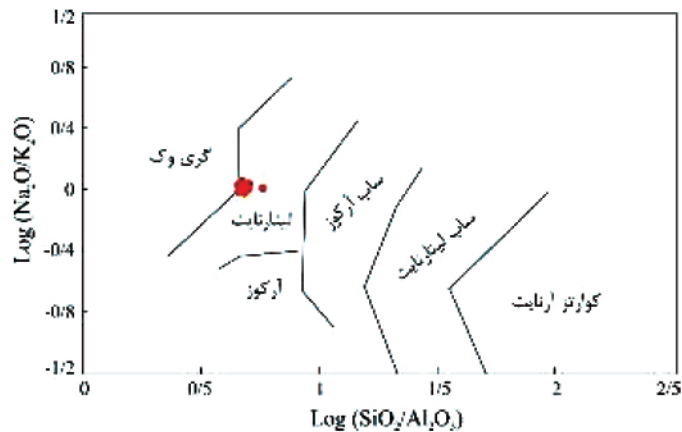


شکل ۱۲. بررسی تغییرات اکسیدهای اصلی نسبت به Al₂O₃، داده‌های UCC (+)، مربوط به پوسته قاره‌ای بالایی می‌باشد (Taylor and MacLennan, 1985)

Discrimination function 1 = 17.33 TiO₂ + 0.607 Al₂O₃ + 0.76 Fe₂O₃ (t) - 1.5 MgO + 0.616 CaO + 0.509 Na₂O - 1.224 K₂O - 9/09
 Discrimination function 2 = 0.445 TiO₂ + 0.07 Al₂O₃ - 0.25 Fe₂O₃ (t) - 1.142 MgO + 0.438 CaO + 1.475 Na₂O + 1.426 K₂O - 6.861

تعیین منشا با استفاده از عناصر اصلی

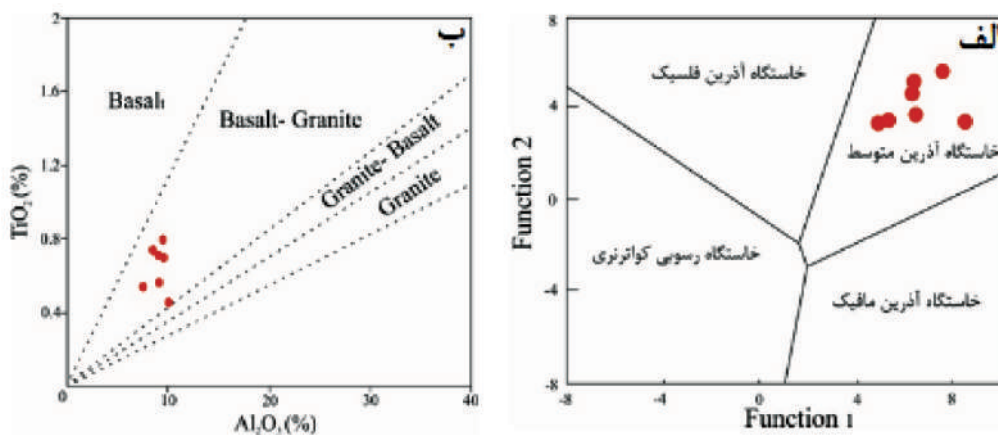
روسر و کورش (Roser and Korsch, 1988) نمودار تفکیکی را براساس نسبت اکسیدهای عناصر اصلی با توابع ترکیبی زیر معرفی کردند.



شکل ۱۳. طبقه‌بندی ماسه‌سنگ‌های کانسار قزل‌جه: طبقه‌بندی ماسه‌سنگ‌ها در نمودار $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ در مقابل $\text{Log}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ براساس (Pettijohn et al., 1972)

در سنگ‌های آواری نشانگر خوبی برای تفسیر سنگ منشأ این سنگ‌ها در مقایسه با دیگر عناصر می‌باشد (Paikaray et al., 2008). موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار نسبت Al_2O_3 به TiO_2 نشان می‌دهد که سنگ منشأ ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه در بخش بازالت-گرانیت قرار می‌گیرند (شکل ۱۴-ب).

این نمودار برای مشخص شدن چهار منشأ رسوبات ۱. خاستگاه آذرین فلسیک، ۲. خاستگاه آذرین حدواسط، ۳. خاستگاه رسوبی-کواترنری و ۴. خاستگاه آذرین مافیک به کار می‌رود. بر اساس شکل (۱۴-الف)، اکثر نمونه‌های آنالیز شده از سازند قرمز بالایی در ناحیه در بخش خاستگاه آذرین حدواسط قرار می‌گیرند. نسبت Al_2O_3 به TiO_2



شکل ۱۴. تعیین منشأ ماسه‌سنگ‌های کانسار مورد مطالعه براساس عناصر اصلی. الف) دیاگرام تفکیکی براساس عناصر اصلی (Rosser and Korsch, 1988)، ب) نمودار نسبت Al_2O_3 به TiO_2 (Paikaray et al., 2008)

تعیین محیط تکتونیکی براساس داده‌های ژئوشیمیایی

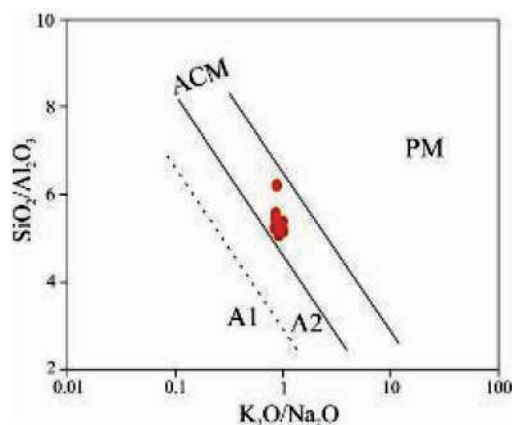
قاره‌ای فعال یا کوه‌زایی و حاشیه گسلی امتدادلغز را شامل می‌شود (Garzanti et al., 2007; Garzanti and Vezzoli, 2003; Dickinson et al., 1983; Dickinson and Suczek., 1979). مفید بودن بررسی ژئوشیمی عناصر اصلی و کمیاب سنگ‌های رسوبی با

جایگاه تکتونیکی، دو ویژگی بررسی نواحی خاستگاهی (شامل بلوک قاره‌ای، سیستم کمان‌های آتشفشانی و کمربندهای تصادمی) و بررسی نوع مرز بین صفحات (شامل حاشیه قاره‌ای غیرفعال یا ریفتی، حاشیه

ژئوشیمی در تفسیر جایگاه‌های زمین‌ساختی را با احتیاط پیشنهاد کرده‌اند.

نمودارهای دو متغیره‌ای برای تعیین محیط تکتونیکی و جایگاه زمین‌ساختی توسط روسر و کورش (Rosser and Korsch, 1986) ارائه شدند. براساس نمودار (شکل ۱۵) و رسم نسبت‌های $K_2O/Na_2O-SiO_2/Na_2O$ نمونه‌های مورد مطالعه در حاشیه فعال قاره‌ای قرار گرفته‌اند.

استفاده از نمودارهای تفکیکی برای پی بردن به جایگاه زمین‌ساختی توسط محققان مختلفی شرح داده شده است (به‌عنوان مثال: Roser and Korsch, 1983; Bhatia, 1986). با این وجود، مشکلاتی در استفاده از ژئوشیمی سنگ‌های رسوبی برای تعیین محیط تکتونیکی وجود دارد، اما آرمسترانگ و ورما (Armstrong et al., 2004) به دلیل این ابهام در نمودارهای تفکیکی استفاده از



شکل ۱۵. نمودار موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در کانسار قزلبه (Rosser and Korsch, 1986)، (A1= Arc setting, basaltic and andesitic detritus; A2= Evolved arc setting, felsitic-plutonic detritus; ACM= Active Continental Margin; PM= Passive Margin)

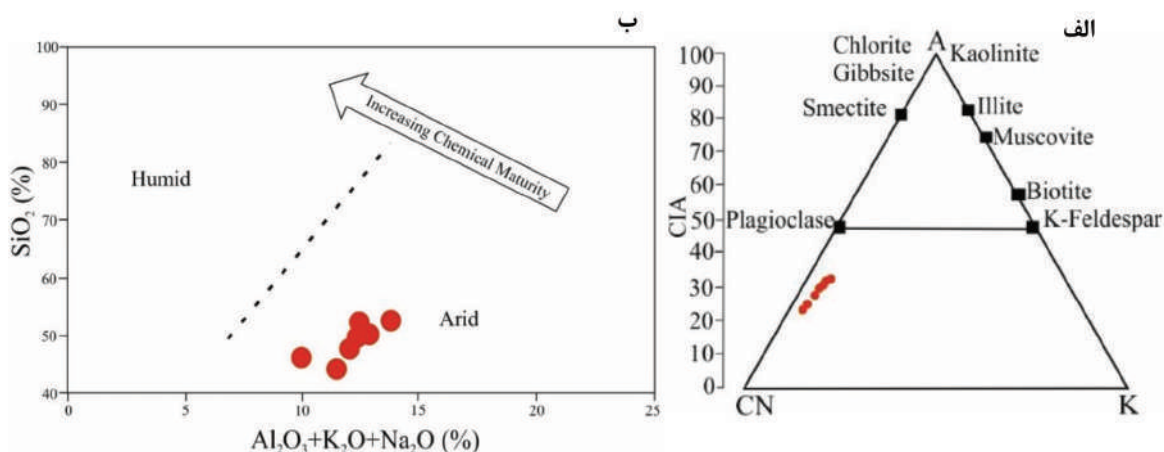
تعیین هوازگی و آب‌وهوای سنگ منشاء ماسه‌سنگ‌ها براساس آنالیز ژئوشیمیایی

فرمول‌ها است. مقدار CaO در آنالیزهای ژئوشیمیایی مربوط به اجزای سیلیکاته و سیمان‌های دیاژنتیکی است، لذا این مقدار باید تصحیح گردد. میزان بالای CIA بیانگر حذف کاتیون‌های ناپایدار (Ca^{2+} , Na^+ , K^+) نسبت به اجزای باقیمانده پایدار (Ti^{4+} و Al^{3+}) در طی هوازگی و میزان کم CIA نشان‌دهنده نبود دگرسانی شیمیایی و منعکس‌کننده شرایط سرد یا خشک می‌باشد (Nesbitt and Young, 1982). میزان هوازگی را می‌توان با استفاده از نمودار سه‌تایی $Al_2O_3-CaO+Na_2O-K_2O$ به دست آورد. در این نمودار هوازگی دارای روند موازی ضلع A-CN است. زیرا در مراحل اولیه هوازگی میزان یون‌های سدیم و پتاسیم با تخریب و از بین رفتن میزان فلدسپات‌ها کم می‌شود و با ادامه‌ی این روند و تخریب فلدسپات‌های پتاسیم‌دار، یون پتاسیم نیز کاهش یافته و روند هوازگی به سمت Al_2O_3 تغییر مکان می‌دهد (Paikaray et al., 2008). براساس این

میزان هوازگی در ناحیه سنگ منشاء یکی از عواملی است که باعث تغییر در ترکیب شیمیایی ماسه‌سنگ‌ها می‌شود. لذا با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی و وجود ارتباط بین عناصر قلیایی و قلیایی خاکی می‌توان میزان هوازگی در سنگ‌های رسوبی را تعیین کرد (Nesbitt and Young, 1982). تاریخچه هوازگی سنگ‌های آواری را اغلب توسط محاسبه نسبت اکسیدهای متحرک CaO و K_2O , Na_2O نسبت به اکسید غیرمتحرک Al_2O_3 تخمین می‌زنند (Nesbitt and Young, 1984, 1989). از اندیس‌های معمول هوازگی می‌توان به اندیس هوازگی نسبیت و یانگ (Nesbitt and Young, 1982)، اشاره کرد. نکته قابل توجه در محاسبه اندیس هوازگی، قرارگیری تنها مقادیر CaO موجود در کانی‌های سیلیکاتی در این

نمودار، ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه تحت تاثیر هوازدگی شیمیایی پایین قرار گرفته و در شرایط مشابه آب و هوای گرم و خشک قرار داشته‌اند (شکل ۱۶-الف). حضور کانی‌های تبخیری در بخش‌هایی از سازند قرمز بالایی، می‌تواند تاییدی بر این شرایط آب و هوایی در زمان تشکیل ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه باشد.

در نمودار SiO_2 در برابر $Al_2O_3 + K_2O + Na_2O$ (Suttner and Dutta, 1986) ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه دارای آب و هوای خشک و بلوغ شیمیایی پایین می‌باشند (شکل ۱۶-ب).



شکل ۱۶. الف) نمودار روند هوازدگی توسط مثلث (A-CN-K (Nesbitt and Young, 1982)، ب) نمودار تعیین‌کننده آب و هوایی (Suttner and Dutta, 1986)

شامل ماسه‌سنگ، کنگلومرا و کمی شیل تشکیل می‌شوند. محیط‌های ریفتی و کششی، نواحی دارای گنبد‌های نمکی و همچنین حوضه‌های فورلندی، برای تشکیل این کانسارها مناسب می‌باشند. همان‌طور که در بخش‌های قبلی مقاله نیز ذکر شد، سازند قرمز بالایی که میزبان کانه‌زایی کانسارهای مس در این ناحیه از زنجان می‌باشد، به همراه سازندهای قرمز زیرین و قم در یک حوضه فورلندی (Ballato et al., 2016) و یا حوضه بین کوهی (Maghfouri et al., 2020) تشکیل شده است. محیط تشکیل این کانسارها، محیط‌های ساحلی و نواحی کم‌عمق است (Kirkham et al., 1996; Hitzman et al., 2005). از عوامل احیاکننده در این تیپ از کانسارها می‌توان به واریزه‌های ارگانیکی که در ماسه‌سنگ‌های میزبان وجود دارد و همچنین مقدار کمتری پیریت اشاره کرد. از نمونه‌های این کانسارها می‌توان به کانسار Nacimiento در آمریکای Coroco (Woodward et al., 1974) در بولیوی (Avila-Salinas, 1990) و Lisbon Valley در آمریکا (Thorson et al., 2005) اشاره کرد.

نوع کانه‌زایی کانسار مس و سرب-روی قزلجه

کانسارهای سرب و روی با میزبان ماسه‌سنگی در گستره وسیعی از سنگ‌های کربناته تا سیلیسی آواری تشکیل می‌شوند. رده‌بندی‌های مختلفی برای کانسارهای مس با میزبان رسوبی ارائه شده‌اند؛ که می‌توان به رده‌بندی هیتزمن و همکاران (Hitzman et al., 2010) اشاره کرد. هیتزمن و همکاران (Hitzman et al., 2010) کانسارهای مس رسوبی را براساس نوع سنگ میزبان، همچنین نوع و میزان عامل احیا در محیط رسوب‌گذاری به سه دسته Redbed، Reduced facies و Revett تقسیم‌بندی کرده‌اند. با توجه به شواهد موجود در کانسار قزلجه، مانند سنگ میزبان ماسه‌سنگی، موقعیت تکتونیکی، محیط تشکیل، بافت و ساخت، ژئومتری ماده معدنی، دگرسانی غالب، فراوانی عامل احیا و عناصر همراه و عوامل کنترل‌کننده کانه‌زایی می‌توان گفت که کانسار مس و سرب-روی قزلجه از نوع کانسارهای مس رسوبی تیپ Redbed می‌باشد (جدول ۲). کانسارهای Redbed در توالی‌های رسوبی-تخریبی Redbed

نحوه تشکیل کانسار قزلجه

(1973). بعد از این مرحله، در مرحله دیاژنز اولیه طی فرآیند هیدرولیز، کانی‌های سیلیکاته و اکسیدی در توالی Redbed (مانند پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت و مگنتیت) ناپایدار می‌شوند و باعث آزاد شدن آهن موجود در آن‌ها شده و به صورت آهن فریک در می‌آید. این هیدروکسیدها اطراف دانه‌های آواری تجمع پیدا کرده و باعث قرمز شدن رسوبات در حین دیاژنز اولیه می‌شوند (Walker, 1989). همچنین عناصر دیگری مثل سرب-روی، مس و نقره از درون شبکه کانی‌هایی از جمله فلدسپات‌ها، پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت و مگنتیت، هم‌زمان با آهن آزاد می‌شوند و وارد سیال اکسیدی می‌شوند. عناصر آزاد شده حین این مرحله توسط هیدروکسیدهای آهن جذب می‌شوند (Brown, 2003).

کانسارهای مس رسوبی در ماسه‌سنگ‌های میزبان کانه‌زایی در طی فرآیند دیاژنز تشکیل می‌شوند (Walker, 1989; Hitzman, 2005). با توجه به ویژگی‌های بیان شده و مدل‌های ارائه شده توسط کاکس و همکاران (Cox et al., 2007) و هیتزمن و همکاران (Hitzman et al., 2005) برای تشکیل کانسارهای مس رسوبی تیپ Redbed و تشابه کانی‌شناسی، سنگ میزبان و عامل احیا کانسار قزلجه، نحوه تشکیل این کانسار را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

در این نوع کانسارها در مرحله هم‌زمان با رسوب‌گذاری پیریت‌های فرامبوئیدال از زل سولفیدی به همراه رسوبات ته‌نشست شده و متبلور می‌شوند (Love and Brockley,

جدول ۲. مقایسه کانسار قزلجه با کانسارهای مس رسوبی تیپ Redbed

Deposite	Redbed Cu deposits	Ghezeljeh deposit
Tectonic setting	Rift and in general the extensional setting which contains salt domes, foreland basins	Forland basin or intera-mountain basins which contain evaporative layers and salt domes
Deposition environment	Coastal environments and shallow areas	Probably coastal and tidal environment
Host rock	Redbed clastic sequence contains conglomerate, sandstone and marl	Sandstone and siltestone
Age	Neoproterozoic-Late Mesozoic-Early Cenozoic	Miocene
Geometry	Stratabound with bedding of lenzoid horizon	Stratabound with bedding of lenzoid horizon
Texture and structure	Disseminate, replacement, solution seams, cloform, relict	Disseminate, replacement, solution seams, framboidal pyrite, cloform relict
Mineralogy	Chalcopyrite, chalcocite, covellite, bornite, pyrite, galena, sphalerite, native copper and silver,	Chalcopyrite, chalcocite, bornite, pyrite, galena, sphalerite, covellite, cerussite, smithsonite, malachite, azurite
Dominant alteration	Bleaching	Bleaching
Copper source	Redbed sequence	sequence Redbed
Accompanying elements	Ag-Pb-Zn-U±Co	Ag-Pb-Zn
Ore controlling factor	Permeability of sandstone layers and the presence of plant fossil debris	Presence of a reducing agent such as framboidal pyrite and plant fossils, the permeability of the host rock, evaporate layers and salt domes, faults and fractures
Reference	Woodward et al. (1974), Cox et al. (2007), Thorson (2005), Avila-Salinas (1990), Flint (1989)	Mirhosseini et al. (2020) and the present study

جوی بر روی کانسار تاثیر گذاشته و کانی‌های ثانویه از جمله سروریت، کوولیت، کالکوسیت، مالاکیت، آزوریت و اکسیدهای آهن از تجزیه و دگرسانی کانی‌های اولیه حاصل شده‌اند.

نتیجه‌گیری

براساس مطالعات صحرایی انجام شده در این پژوهش، واحدهای سنگی رخنمون یافته در کانسار قزلجه شامل سازندهای قرمز زیرین، قم و قرمز بالایی هستند. کانه‌زایی مس و سرب-روی در کانسار قزلجه درون واحدهای ماسه‌سنگی سازند قرمز بالایی با سن میوسن رخ داده است. پژوهش‌های انجام شده در این ناحیه بیانگر آن است که سازند قرمز بالایی به همراه سازندهای قم و قرمز زیرین در یک حوضه فورلندی و حوضه‌های میان کوهی¹ تشکیل شده‌اند.

از عوامل مهم کانه‌زایی در این‌گونه کانسارها می‌توان به وجود عامل احیا، نفوذپذیری سنگ میزبان، لایه‌های تبخیری، گسل‌ها و شکستگی‌ها اشاره کرد. کانه‌زایی مس و سرب-روی در دو افق ماسه‌سنگی به‌صورت هم‌روند با لایه‌بندی رخ داده و دارای بافت‌های دانه‌پراکنده، شبه‌لامینه‌ای، جانیشینی، سیمان بین بلوری، بازماندی است. گالن، اسفالریت، پیریت، کالکوسیت، کالکوپیریت و بورنیت کانی‌های اصلی این کانسار را نشان می‌دهند که در اثر فرآیندهای برونزاد به سروریت، مالاکیت، آزوریت، کوولیت و گوتیت دگرسان شده‌اند. وجود آثار و بقایای گیاهی در افق کانه‌زایی مس یکی از عوامل کنترل‌کننده و احیاکننده محیط و عامل اصلی ته‌نشست سولفیدها در این کانسار می‌باشد که در بسیاری از کانسارهای مس و سرب-روی با میزبان ماسه‌سنگی نیز گزارش شده است. همچنین کانه‌زایی مس در لایه‌های ماسه‌سنگی در نزدیکی آثار و بقایای گیاهی رخ داده که معرف شرایط احیایی برای ته‌نشست مواد معدنی می‌باشد. این کانسار از دید سنگ‌شناسی (سنگ میزبان ماسه‌سنگی)، موقعیت تکتونیکی، محیط تشکیل، کانی‌شناسی ماده معدنی، ساخت و بافت، چینه‌شناسی و

در کانسار قزلجه، در اثر بالآمدگی گنبد‌های نمکی از جمله چهارآباد و ایلجاق، سیالات موجود در لایه‌ها به چرخش درمی‌آیند که در اثر آب‌زدایی و انحلال کانی‌های تبخیری در توالی‌های سازند قرمز بالایی، باعث ایجاد سیالات غنی از کلرید با شوری متوسط تا بالا می‌شوند. این سیالات که حالت اکسیدان دارند باعث حمل فلزاتی مثل سرب و روی، مس و نقره می‌شوند که منشاء این فلزات شاید رسوبات قرمز قاره‌ای می‌باشد. براساس عزیززی و همکاران (Azizi et al., 2018)، سیالات غنی از کلر که از واحدهای تبخیری موجود در بخش‌های زیرین سازند قرمز بالایی منشأ گرفته‌اند، عامل (کمپلکس) اصلی در حمل فلزات در کانسارهای این ناحیه به شمار می‌رود. در اثر فشار لایه‌های بالایی، آب بین سازندی خارج شده و تمرکز بالای مواد آلی در بخش‌های مختلف رسوبات لایه‌های احیا باعث احیایی شدن این سیال می‌شود. باکتری‌های بی‌هوازی، سولفات موجود در آب بین سازندی را احیا کرده و باعث تشکیل دگرسانی در افق و بخش‌های غنی از فسیل گیاهی و گوگرد می‌شود.

در این حالت، آهن موجود در بخش‌های احیایی به‌صورت پیریت دیازنتیک رسوب پیدا می‌کنند. سیال اکسیدی در مسیر چرخش (از طریق گسل‌ها و شکستگی‌ها) خود با رسیدن به افق احیایی غنی از مواد آلی و در اثر برخورد سیال احیایی، باعث تشکیل کانی‌های سولفیدی سرب-روی و مس شده و در نتیجه، کانی‌های پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت، بورنیت، گالن و اسفالریت ته‌نشست پیدا می‌کنند. در کانسارهای مس با میزبان رسوبی، پیریت‌ها و سولفیدهای سرب و روی (گالن و اسفالریت) نسبت به سولفیدهای مس از جمله کالکوسیت در محیط‌های احیایی‌تر و دور از منشأ تشکیل می‌گردند و منطقه‌بندی فلزی را به‌وجود می‌آورند (Cox et al., 2007). از ویژگی‌های مهم کانسارهای مس رسوبی، منطقه‌بندی کانیایی و فلزی آن‌ها است. کانه‌زایی در کانسار قزلجه دارای منطقه‌بندی است و در افق زیرین کانه‌زایی مس رخ داده و در افق بالاتر و به فاصله ۵۰ متر از کانه‌زایی مس، کانه‌زایی سرب و روی تشکیل شده است که از منطقه‌بندی تشکیل شده در کانسارهای نوع Redbed تبعیت می‌کنند. بعد از کانه‌زایی و در اثر بالآمدگی، آب‌های

1. Intra-Mountain Basin

و رسوب‌شناسی ۱۰۸-۸۷: (۴) ۳۶.
- نخجوانی، ب.، علوی، س.غ. و نظری، ب.، ۱۳۹۸.
بررسی زمین‌شناسی، کانه‌زایی مس، رفتار زمین‌شیمی
عناصر و ارتباط آن با سنگ میزبان ماسه‌سنگی در منطقه
توپچی، استان آذربایجان شرقی، فصلنامه زمین‌شناسی
ایران، ۵۱، ۱۳، ۴۷-۶۳.

- نوری، م.، کوهستانی، ح.، نباتیان، ق.، مختاری،
م.ع.ا. و زهدی، ا.، ۱۴۰۰. زمین‌شناسی، کانه‌زایی و
ژنز کانسار سلسنتین مادآباد، جنوب زنجان، فصلنامه
زمین‌شناسی ایران، ۶۰، ۱۵، ۵۹-۷۵.

- نوری، م.، زهدی، ا.، کوهستانی، ح.، نباتیان،
ق. و مختاری، م.ع.ا.، ۱۳۹۸. مطالعه کانی‌شناسی اولیه
کربنات‌های سازند قم با استفاده از مطالعات پتروگرافی
و ژئوشیمیایی در بُرش کانسار سلسنتین مادآباد (جنوب
زنجان)، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۳، ۵۱، ۱۵-۱.

- Aghanabati, A., 2005. Geology of Iran.
Geological Survey of Iran, Tehran, 538.

- Aghanabati A., 1998. Major sedimentary
and structural units of Iran (map). Geosciences 7:
29-30.

- Alavi, M., 1991. Sedimentary and struc-
tural characteristics of the Paleo-Tethys rem-
nants in northeastern Iran. Geological Society of
America Bulletin, 103(8): 983-992. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<0983:SASCO T>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0983:SASCO T>2.3.CO;2)

- Armstrong-Altrin, J. S., Lee, Y. I., Verma,
S. P. and Ramasamy, S., 2004. Geochemistry of
sandstones from the Upper Miocene Kudankulam
Formation, southern India: Implications for prov-
enance, weathering and tectonic setting. Journal of
Sedimentary Research, 74(2), 285-297.

- Avila-Salinas, W., 1990. Origin of the
copper ores at Corocoro, Bolivia. In: L. Font-
boté, G.C. Amstutz, M. Cardozo, E. Cedillo and
J. Frutos (Editors), Stratabound Ore Deposits in
the Andes. Special Publication 8 of the Society for
Geology Applied to Mineral Deposits, 8. Spring-
er, Berlin, Heidelberg, 1-52.

- Azizi, H., Hosseinzadeh, M. R., Moayyed,

عوامل کنترل‌کننده کانه‌زایی مشابه کانسارهای رسوبی تیپ
Redbed است. مطالعات انجام گرفته بر روی کانسارهای
اورتاسو و چرلانقوش و قزلجه نتایج حاصل از این
مطالعات را تایید می‌کنند که محیط تشکیل این کانسارها
در سازند قرمز بالایی محیط‌های رودخانه‌ای و جزرومدی
بوده است. مطالعه کانسار مس و سرب-روی قزلجه می‌تواند
الگوی برای بررسی و اکتشاف این نوع کانسارها و بررسی
عوامل کنترل‌کننده تشکیل و تمرکز آنها باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه
زنجان در انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌کنند. همچنین
نویسندگان از داورهای محترم نیز به دلیل ارائه نظرات
سازنده آنها که موجب غنای مقاله شد، سپاسگزارند.

منابع

- آقانباتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، سازمان
زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- حقیقی، آ.، ۱۳۹۵. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی،
ژئوشیمی و ژنز کانسار سرب-روی اورتاسو، شمال غرب
زنجان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده علوم زمین،
دانشگاه زنجان، ۱۴۰.

- رجب‌زاده، ع.، کوهستانی، ح.، مختاری،
م.ع.ا. و زهدی، ا.، ۱۳۹۵. سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی
سنگ میزبان کانسار سرب-روی و مس چهارآباد، شمال
باختر زنجان، بیست و چهارمین همایش بلورشناسی و
کانی‌شناسی ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

- شکوری نکو، ن.، ۱۳۹۷. زمین‌شناسی، ژئوشیمی و
خاستگاه کانسار سرب و روی ساری‌کند، شمال غرب زنجان،
پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده علوم زمین، دانشگاه
زنجان، ۱۴۷.

- لطفی، م.، ۱۳۸۰. نقشه زمین‌شناسی ماهنشان
با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات
معدنی کشور.

- میرحسینی، ع.، نباتیان، ق.، زهدی، ا. و سلسانی،
آ.، ۱۳۹۹. چینه‌نگاری سنگی، پتروگرافی و ژئوشیمی
ماسه‌سنگ‌های بخش میانی سازند قرمز بالایی منطقه
قزلجه، شمال غرب زنجان، مجله پژوهش‌های چینه‌نگاری

- M. and Siahcheshm, K., 2018. Geology and geochemistry of the sediment-hosted stratabound red bed-type Cu-Pb (Zn-Ag) mineralization in the Dozkand-Moshampa Area, NW Zanjan, Iran. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 195(2): 123-143. DOI: 10.1127/njma/2018/0101
- Ballato, P., Cifelli, F., Heidarzadeh, Gh., Ghassemi, M. R., Wickert, A. D., Hassanzadeh, J., Dupont-Nivet, G., Balling, P., Sudo, M., Zeilinger, G., Schmitt, A.K., Mattei, M. and Strecker, M.R., 2016. Tectono-sedimentary evolution of the northern Iranian Plateau: Insights from middle-late Miocene foreland-basin deposits. *Basin Research*, 29(4): 417-446. <https://doi.org/10.1111/bre.12180>
 - Bauluz, B., Mayayo, M. J., Fernandez-Nieto, C. and Lopez, J. M. G., 2000. Geochemistry of Precambrian and Paleozoic siliciclastic rocks from the Iberian Range (NE Spain): Implications for source-area weathering, sorting, provenance, and tectonic setting. *Chemical Geology*, 168(1-2): 135-150.
 - Bhatia, M. R., 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6): 611-627.
 - Brown, M., 2006. Duality of thermal regimes is the distinctive characteristic of plate tectonics since the Neoproterozoic. *Geology*, 34(11): 961-964. <https://doi.org/10.1130/G22853A.1>
 - Brown, A. C., 2003. Redbeds: Source of metals for sediment-hosted stratiform copper, sandstone copper, sandstone lead and sandstone uranium-vanadium deposits. *Geochemistry of sediments and sedimentary rocks: Evolutionary considerations to mineral deposit-forming environments*. Geological Association of Canada, *Geotext*, 4: 121-133.
 - Cardenas, A. A., Girty, G. H., Hanson, A. D., Lahren, M. M., Knaack, C. and Johnson, D., 1996. Assessing differences in composition between low metamorphic grade mudstones and high-grade schists using logratio techniques. *The Journal of Geology*, 104(3): 279-293.
 - Cox D. P., Lindsey D. A., Singer D. A. and Diggles M. F., 2007. Sediment-hosted copper deposits of the world-deposit models and database. U.S. Geological Survey, Open-file report 03-107, 50 p. <https://doi.org/10.3133/ofr2003107>
 - Dabard, M. P., 1990. Lower Brioverian formations (Upper Proterozoic) of the Armorican Massif (France): Geodynamic evolution of source areas revealed by sandstone petrography and geochemistry. *Sedimentary Geology*, 69(1-2): 45-58.
 - Das, B. K., Al-Mikhlaifi, A. S. and Kaur, P., 2006. Geochemistry of Mansar Lake sediments, Jammu, India: Implication for source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6): 649-668.
 - Taylor, S. R. and McLennan, S. M., 1985. *The continental crust: Its composition and evolution*.
 - Dickinson, W. R. and Suczek, C. A., 1979. Plate tectonics and sandstone compositions. *Aapg Bulletin*, 63(12): 2164-2182.
 - Dickinson, W. R., Beard, L. S., Brakenridge, G. R., Erjavec, J. L., Ferguson, R. C., Inman, K. F. and Ryberg, P. T., 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geological Society of America Bulletin*, 94(2): 222-235.
 - Durieux, C. G. and Brown, A. C., 2007. Geological context, mineralization, and timing of the Juramento sediment-hosted stratiform copper-silver deposit, Salta district, northwestern Argentina. *Mineralium Deposita* 42(8): 879-899. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0138-2>
 - Flint, S. S., 1989. Sediment-hosted stratabound copper deposits of the Central Andes. *Geological Association of Canada Special Paper* 36: 371-398. <https://www.research.manchester.ac.uk/portal/en/publications/sedimenthosted-stratabound-copper-deposits-of-the-central-andes>

- (290b89f5-8f57-400a-b3a0-e8979b8dedfa)/export.html#export
- Garzanti, E., Doglioni, C., Vezzoli, G. and Ando, S., 2007. Orogenic belts and orogenic sediment provenance. *The Journal of Geology*, 115(3): 315-334.
 - Garzanti, E. and Vezzoli, G., 2003. A classification of metamorphic grains in sands based on their composition and grade. *Journal of Sedimentary Research*, 73(5): 830-837.
 - Hitzman, M.W., Selley, D. and Bull, S., 2010. Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through Earth history. *Economic Geology*, 105(3): 627-639. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.627>
 - Hitzman, M., Kirkham, R., Broughton, D., Thorson, J. and Selley, D., 2005. The sediment-hosted stratiform copper ore system. In: J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), 100th Anniversary volume. Society of Economic Geologists, Littleton, 609-642.
 - Kirkham, R. V., Eckstrand, O. R., Sinclair, W. D. and Thorpe, R. I., 1996. Sediment-hosted copper. *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*, 223-240.
 - Love, L. G. and Brockley, H., 1973. Peripheral radial texture in framboids of poly-framboidal pyrite. *Fortschr. Miner*, 50(3): 264-269. <https://doi.org/10.1007/BF00563277>
 - MacIntyre, T. J., 2005. Fault-controlled hydrocarbon-related bleaching and sediment-hosted copper mineralization of the Jurassic Wingate sandstone at the Cashin Mine, Montrose county, Colorado. M.Sc. thesis, Colorado School of Mines, Colorado, United State, 360 pp.
 - Maghfouri, S., Rastad, E., Borg, G., Hosseinzadeh, M. R., Movahednia, M., Mahdavi, A. and Mousivand, F., 2020. Temporal-spatial distribution of sediment-hosted stratabound copper deposits in Iran; Implications for future exploration. *Ore Geology Reviews* 127(1): 1-30. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103834>
 - Nesbitt, H. W. and Young, G. M., 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journal of Geology*, 97(2): 129-147.
 - Nesbitt, H. W. and Young, G. M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1523-1534.
 - Nesbitt, H. W. and Young, G. M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885): 715.
 - Paikaray, S., Banerjee, S. and Mukherji, S., 2008. Geochemistry of shales from the Paleoproterozoic to Neoproterozoic Vindhyan Supergroup: Implications on provenance, tectonics and paleoweathering. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(1): 34-48.
 - Pettijohn F. J., Potter P. E. and Siever R., 1972. Sand and sandstones. Springer-Verlog, New York.
 - Roser, B. P. and Korsch, R. J., 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *The Journal of Geology*, 94(5): 635-650.
 - Roser, B. P. and Korsch, R. J., 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical geology*, 67(1-2): 119-139. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
 - Suttner, L. J. and Dutta, P. K., 1986. Alluvial sandstone composition and paleoclimate; I, Framework mineralogy. *Journal of Sedimentary Research*, 56(3): 329-345. <https://doi.org/10.1306/212F8909-2B24-11D7-8648000102C1865D>
 - Taylor, S. R. and McLennan, S. M., 1985. The continental crust: Its composition and evolution.

- Thorson, J.P., 2005. Lisbon valley sediment-hosted copper deposits and Paradox basin fluids trip. Society of Economic Geologists, USA, guidebook series 37, 43pp. <https://doi.org/10.5382/GB.37>
- Tucker, M. E., 2009. Sedimentary petrology: An introduction to the origin of sedimentary rocks. John Wiley and Sons, London, 272 pp.
- Walker, T. R., 1989. Application of diagenetic alterations in redbeds to the origin of copper in stratiform copper deposits. In: R. W. Boyle, A. C. Brown, W. Jefferson, E. C. Jowett and R. V. Kirkham (Editors), sediment-hosted stratiform copper deposit. Geological Association of Canada, Canada, 36: 85-96.
- Whitney, D. L., and Evans, B. W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist 95(1): 185-187. DOI: 10.2138/am.2010.3371
- Woodward, L. A., Kaufman, W. H., Schumacher, O. L., and Talbott, L. W., 1974. Strata-bound copper deposits in Triassic sandstone of Sierra Nacimiento, New Mexico. Economic Geology 69(1): 108-120. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.69.1.108>